

APLICACIÓN DEL CRITERIO DEL DESPLAZAMIENTO DE NEWMARK AL ESTUDIO DE INESTABILIDADES EN LADERAS ROCOSAS INDUCIDAS POR VIBRACIONES DE VOLADURAS

Albert MACAU¹, Marc JANERAS² y Sara FIGUERAS¹

¹ Institut Geològic de Catalunya
amacau@igc.cat, sfigueras@igc.cat

² GEOCAT Gestió de Projectes, S.A.
mjaneras@ggp.cat

RESUMEN

La metodología del desplazamiento de Newmark considera que una vibración que supere la aceleración crítica de un bloque inestable dará lugar a una disminución instantánea del factor de seguridad del bloque por debajo de la unidad, pero no necesariamente provocará su desprendimiento, sino que esta pulsación inestabilizadora causará un desplazamiento en la junta. La acumulación de pequeños desplazamientos debida a las sucesivas vibraciones puede provocar la caída de la masa rocosa. Esta metodología se ha considerado para estudiar el daño acumulado sobre bloques inestables inducido por vibraciones generadas por voladuras en la excavación del túnel ferroviario en el macizo rocoso del Roc del Dui (Querolbs, Pirineo Oriental). Partiendo de los resultados obtenidos se han establecido los criterios de prevención de caída de bloques utilizados durante el diseño y la excavación del túnel del Roc del Dui en paralelo al servicio comercial por la vía exterior sometida a la dinámica natural de la ladera.

1. INTRODUCCIÓN

La línea férrea del tren cremallera de Vall de Núria de los FGC (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya) está situada en la comarca del Ripollès, en el Pirineo Oriental. Su punto de partida es la localidad de Ribes de Freser y, pasando por la localidad de Querolbs, sube

mediante tracción con cremallera en una pendiente del 15% hasta el santuario de Núria situado a unos 2000 metros de altitud recorriendo un valle de montaña sometido a una dinámica natural de movimientos de masa en las laderas, que suponen un alto riesgo para la única vía de comunicación y acceso a la estación de Vall de Núria. La peligrosidad máxima de desprendimientos rocosos se sitúa al pie de la pared del Roc del Dui (Figura 1), entre los puntos kilométricos PK 8 + 500 y PK 9 + 100.



Figura 1: Vista de la pared del Roc del Dui y de la línea férrea en el tramo Navarro – Fénech, desde la ladera opuesta.

Las laderas próximas al túnel del Roc del Dui están sometidas a una dinámica natural que sumada a las propias características del macizo rocoso puede producir movimientos de masa. Las lluvias y heladas son los principales agentes de erosión que actúan en las juntas que delimitan los bloques y aplican fuerzas movilizadoras que disminuyen la estabilidad de los bloques, por tanto se comportan como unos factores preparatorios del movimiento de masa. El viento también puede actuar como un factor preparatorio, siempre y cuando haya vegetación en las juntas que pueda producir una fuerza movilizadora. Otro factor preparatorio son los sismos que afectan a todo el macizo. El túnel del Roc del Dui se localiza en una zona con presencia de fallas activas en la que se producen frecuentemente sismos de baja magnitud. La acción de los factores preparatorios aumenta progresivamente la inestabilidad acumulada en cada bloque, precediendo a la ruptura del equilibrio por el factor desencadenante. El factor que desencadena el desprendimiento final de un bloque puede ser cualquiera de los agentes preparatorios que se han descrito, a pesar de que no necesariamente tiene que ser la acción más acusada.

El trazado actual de la vía del tren cremallera está situado, en buena parte de su recorrido, por encima de las zonas de parada de bloques, por tanto en medio de las trayectorias de los posibles desprendimientos. Este hecho comporta una peligrosidad muy elevada en relación a

los desprendimientos de bloques. Para disminuir el riesgo de desprendimientos se han instalado a lo largo del recorrido del tren cremallera gran cantidad de medidas de protección de la vía, como son barreras dinámicas, bulones o mallas de triple torsión (Prat et al., 2009).

Durante el año 2003 se produjeron tres desprendimientos importantes en este tramo, mencionamos especialmente el del día 4 de abril, ya que produjo daños considerables en la infraestructura e interrumpió la circulación de trenes durante cinco días. A raíz de estos hechos, se valoraron diferentes opciones para proteger la vía en este tramo, hasta que se optó por la construcción de un túnel de unos 1300 metros de longitud para evitar el tramo más expuesto (Janeras et al., 2009).

2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR LAS VOLADURAS

La concepción del túnel consiste en una variante subterránea del trazado del tren cremallera, en paralelo al trazado actual con una separación limitada respecto a la ladera para mantenerse cercano al exterior y permitir la comunicación mediante galerías de evacuación. En la Figura 2 se muestra una planta del trazado del túnel del Roc del Dui y de las galerías de evacuación junto con el trazado actual de la vía del tren cremallera de Vall de Núria.

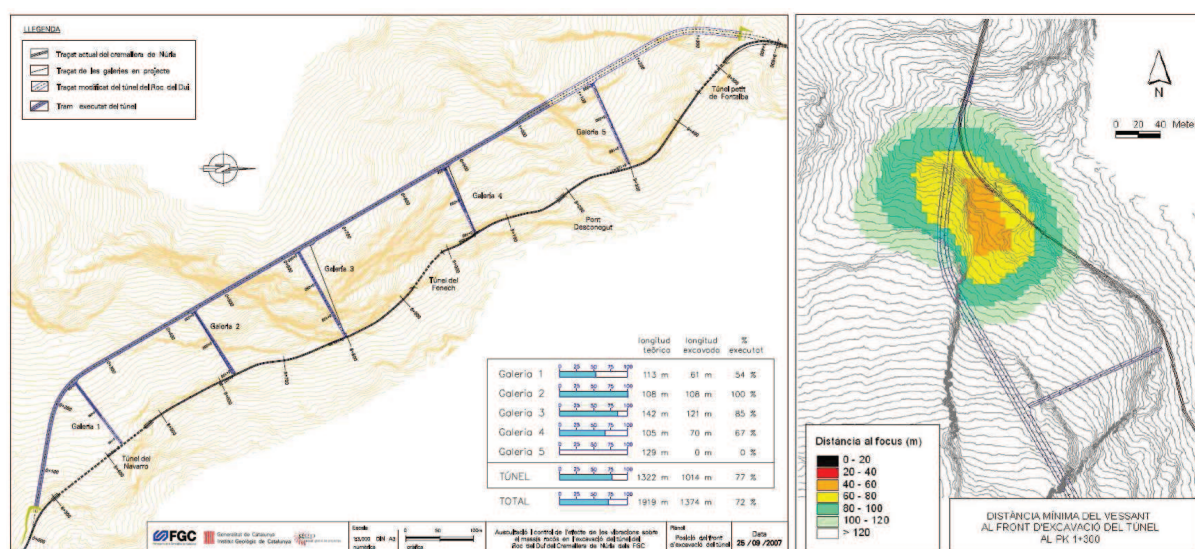


Figura 2: Plano de seguimiento de la excavación del túnel principal y de las galerías a fecha del 25 de Septiembre de 2007 al 72%. Se observa el trazado del nuevo túnel respecto a la vía exterior del tren cremallera de Núria. A la derecha, ejemplo de contornos de proximidad al frente de la voladura a su paso por el PK 1+300, a poca distancia del cañal de la boca norte hacia el exterior.

Dadas las características de la roca del macizo del Roc del Dui, durante la construcción de la

variante de la vía del tren cremallera las voladuras no eran un recurso ocasional, sino sistemático durante toda la excavación del túnel. De forma preliminar se preveía un ritmo de excavación del túnel de dos voladuras diarias y cerca de un año de término de ejecución. En consecuencia, los efectos de las vibraciones sobre bloques potencialmente inestables se podrían sumar en sucesivas voladuras hasta provocar el desprendimiento de estos. Hay que tener en cuenta que la excavación del túnel del Roc del Dui se ejecutó sin la interrupción del servicio comercial del tren cremallera y por tanto se quería evitar que se produjeran desprendimientos durante la excavación del túnel. Por este motivo se utilizó la metodología del desplazamiento de Newmark (Newmark, 1965) para analizar en todo el macizo rocoso el daño acumulado por las vibraciones generadas en las sucesivas voladuras y, a partir de estos cálculos, proponer unos criterios de seguridad para evitar la caída de bloques en la vía.

3. EL MÉTODO DEL DESPLAZAMIENTO DE NEWMARK

En general, se puede expresar la estabilidad estática del talud (factor de seguridad, FS) como la relación entre la máxima resistencia del material del talud (R_{max}) y la fuerza gravitacional (L).

$$FS = \frac{R_{max}}{L} \quad (1)$$

Si se define la aceleración crítica (Ac) como la diferencia entre la máxima resistencia del material (R_{max}) y la carga gravitacional (L) dividida por la masa (m) (Wilson y Keefer, 1983):

$$Ac = \frac{R_{max} - L}{m} \quad (2)$$

se puede relacionar el factor de seguridad del talud con la aceleración crítica con la expresión:

$$Ac = (FS - 1) \cdot \frac{L}{m} \quad (3)$$

De este modo, se define la aceleración crítica como aquella para la cual se llega al estado crítico de inestabilidad, o sea un factor de seguridad al deslizamiento $FS=1$ en un análisis pseudoestático. Si esta fuerza inercial fuera constante en el tiempo, en un cálculo estático se finalizaría con el inicio del movimiento de caída pero la aceleración es ondulatoria, es decir, sus picos se convierten en acciones de pulsación. Una vibración que supere la aceleración crítica de un bloque inestable provocará una disminución instantánea del factor de seguridad del bloque por debajo de la unidad, pero no necesariamente provocará su desprendimiento, sino que causará un desplazamiento en la junta. La acumulación de pequeños desplazamientos debido a sucesivas voladuras puede provocar la caída de la masa rocosa.

El análisis de Newmark calcula el desplazamiento de un deslizamiento (representado por un bloque rígido) bajo la acción de un movimiento sísmico. El desplazamiento (u) está calculado en función de dos entradas: la aceleración crítica (Ac), que se ha calculado previamente y un

registro de la aceleración del suelo en un función del tiempo $a(t)$ o acelerograma. Si la $a(t) < A_c$, el bloque deslizante es estacionario respecto a la pendiente. Una vez que la amplitud del movimiento supera la aceleración crítica ($a(t) > A_c$), el bloque se ve afectado por el desplazamiento inducido por la pulsación durante toda la fracción de tiempo en que se supera la aceleración crítica. Se llama desplazamiento de Newmark (d_{new}) a la doble integración de la parte del acelerograma que supera el límite de la aceleración crítica. Con este cálculo se cuantifica el exceso de energía acumulada respecto a la condición de equilibrio.

El criterio de rotura o inicio del movimiento se establece con el límite del desplazamiento de Newmark (d_{new}) que puede acumular una masa como máximo hasta salir de la condición de equilibrio en reposo. El valor crítico de desplazamiento puede variar extensamente, dependiendo del mecanismo de falla del talud (caída de roca, hundimiento, deslizamiento del bloque, etc.), la litología, la geometría del talud y la historia previa del movimiento del talud. Para cuantificar este parámetro para una aplicación regional, se puede asignar un valor de 10 cm como desplazamiento crítico de deslizamientos cohesivos. Las caídas de rocas y otros desprendimientos involucran un componente significativo de falla tensional, un mecanismo más quebradizo, por lo cual el desplazamiento crítico es bajo. Así se ha asumido un desplazamiento crítico de 2 cm para desprendimientos (Figueras et al., 2005).

El método del desplazamiento de Newmark fue desarrollado para estudiar el efecto que tienen los sismos como factor desencadenante de los desprendimientos, pero en este estudio el método se ha aplicado a las vibraciones producidas por voladuras. Las principales diferencias que se observan cuando se cambia la fuente que produce la vibración del terreno se encuentran en el contenido frecuencial de la señal y en la atenuación que se produce en esta. La frecuencia de la onda del movimiento del terreno es mucho más alta en el caso de las voladuras que en el caso de los sismos. Por este motivo se deben registrar las voladuras utilizando equipos con una elevada frecuencia de muestreo y un amplio rango de frecuencias. Por otro lado, la vibración del terreno producida por una voladura se atenúa más rápidamente que la vibración que se produce en un sismo. Éste factor limita la región del macizo rocoso que puede sufrir daños en una determinada voladura y, por tanto, es necesario calibrar una ley de atenuación específica para la zona de estudio (Macau, 2008).

4. DISEÑO DEL PROYECTO DEL TÚNEL DEL ROC DEL DUI

Durante el mes de Noviembre de 2004 la Unión Española de Explosivos (UEE) realizó, por encargo de FGC, un ensayo preliminar y un estudio para caracterizar la respuesta rocosa del macizo rocoso del Roc del Dui mediante una ley de atenuación de la vibración. Se dispararon seis cargas de explosivo instantáneas, comprendidas entre 0.235 y 4.7 kg, que se registraron en cinco sensores situados a distancias diferentes, de 15 a 78 metros. Las medidas obtenidas se ajustaron a una ley del tipo:

$$V = K \cdot Q^a \cdot D^b \quad (4)$$

donde V es la velocidad pico de la vibración del terreno (en mm/s), Q es la carga máxima operante de la voladura (en kg) y D es la distancia a la voladura (en m). La calibración que se ha obtenido de los parámetros es $k = 9119.49$, $a = 0.65$ y $b = -2.09$ (UEE, 2004).

Adicionalmente, durante el ensayo de Noviembre de 2004 se realizó una prueba simple consistente en situar bloques sobre el afloramiento rocoso a diferentes distancias de las voladuras. Esta prueba se planteó para obtener información acerca del factor desencadenante de los desprendimientos. Al tratarse de una situación preparada se tiene un control previo de las variables que intervienen en el equilibrio del bloque y, en consecuencia, de cual es la acción que tiene que ejercer una voladura para provocar la caída del bloque. Para comprobar el factor de seguridad se realiza una prueba de tracción (T) sobre el bloque hasta que este se pone en movimiento ($FS=1$):

$$FS = \frac{R}{L + T} = 1 \Rightarrow R = L + T \quad (5)$$

De este modo se ha hallado la fuerza de resistencia del talud que impide el desprendimiento del bloque, y ya se puede calcular el factor de seguridad del bloque.

Se realizó la prueba con cuatro bloques ubicados en planos inclinados a distancias diferentes de las voladuras. En la Tabla 1 se muestran los principales parámetros de cada uno de los bloques. Tanto la masa del bloque como la tracción inestabilizadora (T) se han medido con un dinamómetro. En estos bloques no hay resistencia por cohesión, por tanto la inclinación de los planos, entre 20° y 40° , es inferior a los valores nominales de las juntas del macizo rocoso del Roc del Dui que se sitúa alrededor de 65° .

Nº bloque	Masa (kg)	Tracción T (kp)		Inclinación α ($^\circ$)	FS	Aceleración crítica (g)
		min	max			
1	17.0	6.0	8.0	22	2.1	1.3
2	9.5	1.0	1.4	34	1.3	0.3
3	4.5	0.3	0.4	37	1.1	0.1
4	7.0	0.4	0.8	36	1.2	0.2

Tabla 1. Parámetros de los bloques de la prueba de deslizamiento sobre un plano inclinado.

A partir de la carga de la voladura y de la distancia entre la voladura y el bloque se puede calcular, utilizando la ley de atenuación, el pico de velocidad de vibración del terreno. Durante la ensayo también se determinó la frecuencia predominante media del movimiento de vibración del terreno, que es de 175Hz. Con estos dos datos se pueden calcular los valores máximos de aceleración (a_p) que implicaron la caída de los bloques durante el ensayo. Se puede observar claramente que los bloques del ensayo soportaron máximos de aceleración del terreno muy superiores a la aceleración crítica medida, como se muestra en la Tabla 2. Este

hecho concuerda perfectamente con la teoría de Newmark, ya que estos picos de aceleración son pulsos de vibración de corta duración, debido a que la frecuencia de vibración del movimiento es muy alta.

Nº bloque	Aceleración pico a_p (g)		Aceleración crítica (g)
	Voladura previa al desprendimiento	Voladura que provoca el desprendimiento	
1	2.3	-	1.3
2	2.3	-	0.3
3	2.0	3.2	0.1
4	1.3	2.9	0.2

Tabla 2. Valores de aceleración pico de las voladuras y de aceleración crítica de los bloques.

Un cálculo pseudoestático no explicaría que todos los bloques hayan soportado la acción de la primera voladura. El desprendimiento final se explica por los pequeños desplazamientos del bloque sobre el plano de deslizamiento que estos pulsos acumulan en el conjunto del movimiento vibratorio y con la repetición de las voladuras.

Durante el ensayo de Noviembre de 2004 se instaló un acelerógrafo modelo K2 de la casa Kinematics para obtener los registros temporales de la aceleración del terreno producida por las voladuras. Se ha escalado el acelerograma al nivel de vibración del terreno en la posición de los bloques de ensayo para cada una de las voladuras. De este modo, se obtiene el desplazamiento de Newmark que se acumulan debido a los diferentes picos del registro que superan el valor de la aceleración crítica en cada una de las voladuras, tal como se observa en la Tabla 3.

Nº voladura	Bloque 3		Bloque 4	
	Desplazamiento (cm)	Desplazamiento (cm)	Desplazamiento (cm)	Desplazamiento (cm)
1	0.034	0.034	0.050	0.050
2	0.078	0.112	0.190	0.240
3	0.180	0.292	-	-
4	0.270	0.562	-	-

Tabla 3. Desplazamiento de Newmark acumulado por las diferentes voladuras hasta que se produce el deslizamiento. En rojo el valor de desplazamiento que ha producido la caída.

Las referencias del valor del desplazamiento de Newmark límite consideran valores entre los 2 y 10cm para la activación de desprendimientos de cierta magnitud en laderas producidos por sismos (Wieczorek et al., 1985; Wilson y Keefer, 1983). El modelo estudiado a escala reducida de bloques sobre planos inclinados consiste en masas de dimensiones decimétricas y depositados en un estado inicial bastante precario (FS entre 1.1 y 1.2). En consecuencia, se explica que con un desplazamiento del orden de 3mm se provoque el deslizamiento. Como

criterio para acotar el deslizamiento de un bloque por el efecto de las voladuras durante la excavación del túnel se puede estimar que el valor límite del desplazamiento de Newmark se sitúe entre los 5mm y 5cm. A falta de más referencias y de experimentación en este campo, se considera un desplazamiento acumulado de 1cm como criterio orientativo.

Cada bloque presenta una sensibilidad de sufrir un daño debido a las voladuras más o menos cercanas en función de la estabilidad de éste. Se puede definir el radio de sensibilidad de un bloque como la distancia límite en la que se tiene que situar la voladura con una determinada carga máxima operante para que provoque la disminución del factor de seguridad del bloque hasta la unidad. Partiendo de la ley de atenuación del valor pico de velocidad en función de la carga máxima operante y de la distancia a la voladura así como de la frecuencia predominante media del movimiento de vibración del terreno se puede obtener la ley de atenuación de la vibración del terreno en términos del pico de aceleración. Así se puede calcular, en función de la carga máxima operante de la voladura, la distancia a partir de la cual se superará la aceleración crítica de un bloque con un determinado valor del factor de seguridad. De este modo, se obtiene la longitud de la traza del túnel con afectación sobre el bloque durante la excavación y, a partir del avance en cada voladura, también se conoce el número de voladuras que afectan al bloque. Finalmente, se puede calcular el desplazamiento de Newmark acumulado de todas las voladuras que han afectado al bloque. En la Tabla 4 se muestra el cálculo del radio de sensibilidad, la longitud del túnel con afectación, el número de voladuras que afectan al bloque, el desplazamiento de Newmark máximo de una voladura y el desplazamiento acumulado en todas las voladuras para bloques con diferentes factores de seguridad en túneles con profundidades de 50 y 70 metros considerando un carga máxima operante de 4kg y un avance de excavación de 4 metros.

Profundidad del trazado del túnel (m)	50				70			
FS	1.1	1.3	1.5	2.0	1.1	1.3	1.5	2.0
Radio de sensibilidad (m)	134	79	62	44	134	79	-	-
Longitud de túnel con afectación (m)	248	123	73	-	228	74	-	-
Nº de voladuras	62	31	18	-	57	18	-	-
Desplazamiento máximo (cm)	0.55	0.12	0.03	-	0.11	0.01	-	-
Desplazamiento acumulado (cm)	9.8	1.7	0.3	-	2.20	0.14	-	-

Tabla 4. Radio de sensibilidad, longitud de túnel con afectación, número de voladuras que afectan a un bloque, desplazamiento de Newmark máximo de una voladura y desplazamiento acumulado para bloques con diferentes factores de seguridad en túneles con profundidades de 50 y 70 metros, una carga máxima operante de 4kg y un avance de excavación de 4 metros.

En el caso del túnel con una profundidad de trazado de 50 metros se observa como, a medida que aumenta el factor de seguridad, el daño acumulado en cada bloque va disminuyendo hasta llegar a los bloques con una estabilidad de FS=2.0 donde el daño acumulado es nulo. En los bloques con un factor de seguridad FS=1.1 el desplazamiento de Newmark acumulado en las 62 voladuras es del orden de 1cm, que es valor límite que se ha tomado para el deslizamiento

de un bloque por el efecto de las voladuras. Con una profundidad de trazado de 70 metros, los bloques con un factor de seguridad $FS=1.5$ tampoco se ven afectados por las voladuras, ni tan solo por las más cercanas. Mientras que los bloques con una estabilidad de $FS=1.1$ y $FS=1.3$ acumulan un desplazamiento sensiblemente inferior al obtenido en los cálculos realizados con una profundidad del trazado de 50 metros.

En conclusión, se considera que tomando un criterio de diseño que garantice una profundidad mínima en todo el recorrido del túnel de 50 metros se podrá afectar a bloques que inicialmente se encuentren en equilibrio precario ($FS=1.1$), que por otras causas naturales, como son las lluvias o las heladas, ya podrían desencadenar su movimiento. En cambio, con una profundidad mínima de 70 metros, los efectos de las vibraciones sobre los bloques serán prácticamente imperceptibles respecto a los efectos de los agentes desencadenantes comunes, como son las lluvias o las heladas.

El trazado del túnel del Roc del Dui se proyectó para minimizar la afectación sobre los bloques potencialmente inestables de la ladera. En la mayor parte del recorrido, el recubrimiento mínimo del túnel es superior a 70 metros, pero hay algunas zonas donde el recubrimiento es inferior o alrededor de 70 metros (PK: 0+000 – 0+200), (PK: 0+300 – 0+480), (PK: 0+950 – 1+090) y (PK: 1+210 – 1+440). Además del tronco principal del túnel, se ha aplicado el método en el trazado de las galerías de evacuación, situadas en sentido transversal al túnel, con un perfil de recubrimiento que decrece rápidamente hasta llegar a la superficie de la ladera.

5. SEGUIMIENTO DURANTE LA EXCAVACIÓN DEL TÚNEL

Durante la excavación del túnel del Roc del Dui se realizó una campaña de oscultación y control del efecto de las vibraciones sobre el macizo rocoso. Los objetivos de esta campaña eran comprobar de la validez de la ley de atenuación obtenida en Noviembre de 2004 en las condiciones de trabajo del túnel, y también obtener los valores límite del valor pico de velocidad de vibración como criterio de seguridad para no afectar a los bloques inestables de la ladera en aquellos tramos donde el recubrimiento del túnel fuera menor (tramo inicial y final del túnel principal, tramo final de las galerías de evacuación).

Las voladuras se registraron con dos equipos de medida: Vibracord e Instantel. El sismómetro Vibracord consta de un digitalizador de 12 bits, trabaja con una frecuencia de muestreo de 1024 muestras por segundo en un rango de frecuencias de 0 – 512Hz. Tiene siete canales donde se conectan dos sismómetros triaxiales con una resolución de 0.1mm/s, una frecuencia natural de 4.5Hz y respuesta en frecuencia de 2Hz a 250Hz. Los sismómetros se pueden separar hasta una distancia de 70 metros entre ellos, para poder registrar una voladura desde dos emplazamientos diferentes. También se puede conectar un micrófono para medir el ruido acústico. El sismómetro Instantel trabaja con una frecuencia de muestreo que se puede

seleccionar desde 1024 hasta 16000 muestras por segundo. Tiene cuatro canales donde se conecta un sismómetro triaxial con un rango de frecuencias entre 2 y 250Hz, y con una resolución de 0.0159mm/s, y un acelerómetro uniaxial de rango de frecuencias 1Hz – 3KHz con una resolución de 0.025g.

Desde el día 6 de Noviembre hasta el día 31 de Diciembre de 2006 se registraron un total de 38 voladuras con diferentes cargas máximas operantes y desde diferentes emplazamientos. Se dispone de registros de valores máximos de velocidad en un rango de distancias entre 15 y 111 metros para cargas máximas operantes entre 0.99kg i 8.46kg de explosivo. Los valores de velocidad pico de vibración del terreno varían entre 1.3mm/s y 28.0mm/s. Se comprobó si estos valores se ajustaban a la ley de atenuación obtenida en Noviembre de 2004 (Figura 3 izquierda). Se observó que para cargas máximas operantes superiores a 2.0kg las medidas se alejan ligeramente por encima de la curva, hecho que corresponde a una infravaloración de la ley proyectada para las mayores cargas máximas operantes previstas. De este modo, se consideró necesario realizar una nueva calibración de la ley de atenuación con los datos recogidos durante la excavación del túnel para obtener una buena caracterización de la respuesta del macizo rocoso del Roc del Dui (Figura 3 derecha). El ajuste se realizó partiendo de 72 registros de velocidad medidos con sismómetros situados a distancias de la voladura que variaban entre 15 y 95 metros, y con unas cargas máximas operantes comprendidas entre 0.94 y 8.46kg. Para obtener una buena calibración se descartaron aquellos valores anómalos que se alejaban significativamente del comportamiento medio de las medidas, debido en la mayoría de los casos a problemas con la fijación de los sensores o a voladuras poco efectivas, es decir, que no arrancaban correctamente todo el material. La ley de atenuación obtenida fue:

$$V = 9963.2 \cdot Q^{0.87} \cdot D^{-2.04} \quad (6)$$

donde V es la velocidad pico de la vibración del terreno (en mm/s), Q es la carga máxima operante de la voladura (en kg) y D es la distancia a la voladura (en m). El coeficiente de correlación es del 88.9% y la desviación estándar es de un factor 1.42 respecto al valor obtenido, lo que muestra un buen ajuste de los valores medidos respecto la nueva ley de atenuación calibrada. En la Figura 3 (derecha) se observa como, a pesar de la dispersión de las medidas de velocidad, estas se ajustan alrededor de la nueva ley calibrada. Las diferencias observadas entre las dos leyes de atenuación son poco importantes y no implican variaciones significativas respecto el criterio de seguridad adoptado en el diseño del trazado del túnel, en el que se proponía un recubrimiento mínimo del túnel superior a 70 metros para no afectar a bloques inestables de la ladera del Roc del Dui.

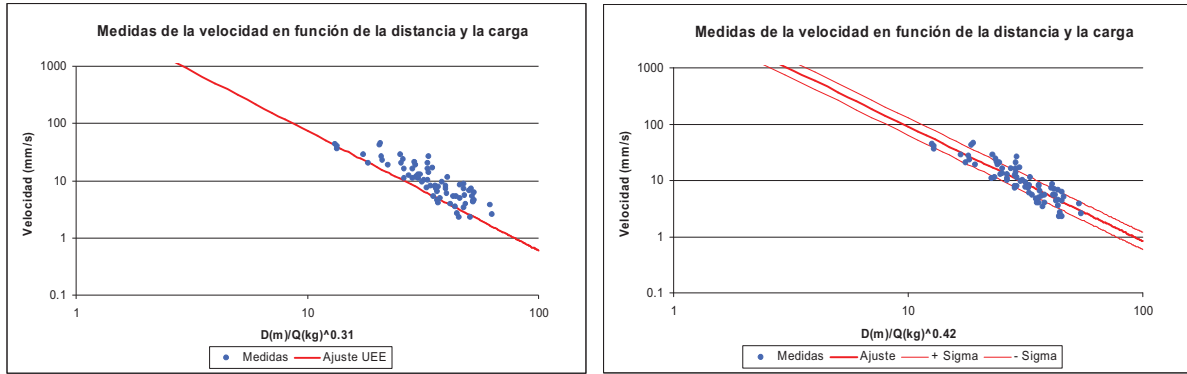


Figura 3: Comparación entre los valores del valor pico de velocidad de vibración del terreno medidos durante la excavación del túnel y la ley de atenuación calibrada por la UEE en Noviembre de 2004 (izquierda), y comparación entre los valores del pico de velocidad de vibración del terreno medidos durante la excavación del túnel y la nueva ley de atenuación calibrada, junto con las bandas de error del ajuste (derecha).

Se ha calculado el desplazamiento de Newmark (d_{new}) de los registros de aceleración obtenidos en cada una de las voladuras. En este cálculo se han considerado bloques con un factor de seguridad al deslizamiento de $FS=1.3$, que les corresponde una aceleración crítica (a_c) de $0.27g$. Dado que un parámetro importante para conocer el grado de daño que se puede acumular en un bloque inestable de la ladera es el desplazamiento de Newmark y que la mayor parte del equipo disponible para medir las vibraciones son sismómetros que proporcionan el movimiento del terreno en términos de la velocidad, será de mucha utilidad encontrar una expresión que relacione el desplazamiento de Newmark con el valor pico de velocidad de vibración del terreno producido por las voladuras. Comparando los valores pico de velocidad de vibración con el desplazamiento de Newmark de cada una de las voladuras (Figura 4 izquierda) se obtienen valores del desplazamiento de Newmark no nulos para valores del pico de velocidad superiores a 7mm/s . De este modo, se puede identificar un umbral para un desplazamiento de Newmark no nulo en función del valor pico de velocidad alrededor de 7mm/s para un factor de seguridad $FS=1.3$. Por otro lado, se observa que para bloques de $FS=1.3$ y valores del pico de velocidad de vibración entre 4mm/s y 7mm/s el desplazamiento de Newmark puede ser diferente de cero debido a múltiples variables durante la ejecución de las voladuras. En este rango de vibraciones se define un cero inestable en el desplazamiento de Newmark, es decir, no es seguro que el daño producido por esta voladura sea nulo, pero en todo caso será muy reducido.

Se pueden ajustar los valores del desplazamiento de Newmark calculados para un factor de seguridad al deslizamiento de $FS=1.3$ en función del pico de velocidad a una ley del tipo $y = a \cdot x^b$ para aquellos registros en que la velocidad supera el umbral de 7mm/s , tal y como se muestra en la Figura 4 (derecha). El ajuste que se obtiene es:

$$d_{new} = 0.002 \cdot V_{pico}^{2.19} \quad (7)$$

donde el desplazamiento de Newmark se expresa en centímetros y el pico de velocidad en milímetros por segundo. El coeficiente de correlación del ajuste es del 92%, que muestra que la ley se ajusta adecuadamente a los datos.

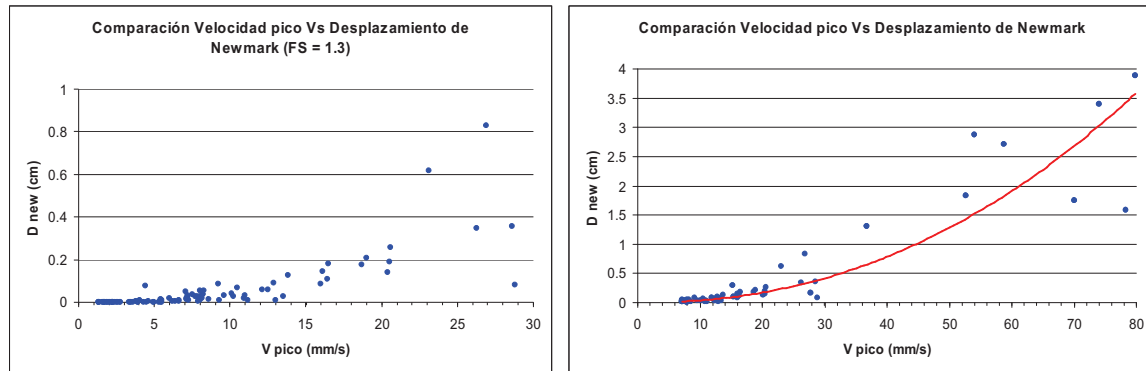


Figura 4: Representación del desplazamiento de Newmark (d_{new}) en función del pico de velocidad (v_{pico}) para bloques con $FS=1.3$ (izquierda), y ajuste del valor del desplazamiento de Newmark en función de la variación del pico de velocidad para bloques con un factor de seguridad $FS=1.3$ (derecha).

Así pues, durante el seguimiento y control de las vibraciones del terreno producidas por las voladuras durante la excavación del túnel del Roc del Dui se han tomado dos valores máximos de velocidad de vibración como criterio de seguridad para no afectar a los bloques inestables de la ladera que son de 4mm/s y 7mm/s.

Cuando la medida del valor máximo de velocidad supere los 4mm/s se considera que es probable que se acumule daño en bloques con un factor de seguridad $FS=1.3$. Si este valor se toma en una zona sin bloques inestables o se trata de una medida puntual no se recomienda la disminución de la carga máxima operante de la voladura, ya que el daño acumulado en los bloques será ínfimo. Cuando el valor máximo de velocidad de vibración supere los 7mm/s se empezará a acumular daño en los bloques de factor de seguridad $FS=1.3$, y por tanto se recomienda la disminución de la carga máxima operante de las voladuras para disminuir las vibraciones que llegan a la superficie de la ladera. Se debe considerar que en el cale y en la excavación del tramo final, tanto del túnel principal como de las galerías de evacuación, se superará ampliamente el valor del pico de velocidad de vibración de 7mm/s. Pero esto sucederá solamente en un área muy reducida alrededor de las bocas exteriores del túnel principal y de las galerías de evacuación, donde se puede hacer un seguimiento de los bloques más inestables de la ladera y si es necesario instalar medidas de protección de la vía del tren cremallera, como son las barreras dinámicas, bulones o mallas de triple torsión.

6. CONCLUSIONES

Se ha calibrado una ley de atenuación de la vibración del terreno en función de la carga

máxima operante y de la distancia a la voladura que se ajuste a los valores del pico de velocidad observados durante la ejecución de la obra del túnel del Roc del Dui. De este modo se conoce el efecto que producen las voladuras en todo el macizo rocoso del Roc del Dui.

Se ha tomado el Desplazamiento de Newmark como parámetro para valorar el daño acumulado en el macizo rocoso del Roc del Dui en las sucesivas voladuras que se han producido durante la excavación del túnel. Se ha considerado un desplazamiento de Newmark de 1cm como desplazamiento límite para iniciar un deslizamiento.

Dado que un parámetro importante para conocer el grado de daño que se puede acumular en un bloque inestable de la ladera es el desplazamiento de Newmark y que la mayor parte del equipo disponible para medir las vibraciones son sismómetros que proporcionan el movimiento del terreno en términos de la velocidad se ha deducido una expresión que relacione el desplazamiento de Newmark con el valor pico de velocidad de vibración del terreno producido por la voladura.

En el seguimiento y control de las vibraciones del terreno producidas por las voladuras durante la excavación del túnel del Roc del Dui se han tomado dos valores máximos de velocidad de vibración como criterio de seguridad para no afectar a los bloques inestables de la ladera de 4 y 7 mm/s.

Cuando la medida del valor máximo de velocidad supere los 4mm/s se considera que es probable que se acumule daño en bloques con un factor de seguridad $FS=1.3$. Si este valor se registra en una zona sin bloques inestables o se trata de una medida puntual no se recomienda la disminución de la carga máxima operante de la voladura, ya que el daño acumulado en los bloques será ínfimo. Cuando el valor del pico de velocidad de vibración supere los 7mm/s se empezará a acumular daño en los bloques de factor de seguridad $FS=1.3$, y por tanto se recomienda la disminución de la carga máxima operante de las voladuras para disminuir las vibraciones que llegan a la superficie de la ladera.

7. BIBLIOGRAFÍA

Figueras, S., Macau, A., Goula, X. y González, M. (2005). Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra. *6º Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Valencia, 21 – 24 de Junio de 2005.

Janeras, M., Buxó, P., Paret, D., Comelles, J., Palau, J. y Solà, A. (2009). Valoración del riesgo como herramienta de análisis de alternativas de mitigación del riesgo de desprendimientos de roca en el Cremallera de Núria. En proc. De: Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, Barcelona, 2009.

Macau, A. (2008). Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 328pp.

Newmark, N.M. (1965). Effects of earthquake on dams and Embankments. *Geotechnique*, vol 15, nº 2, pp 139 – 159.

Prat, E., Janeras, M., Rodríguez, H., Palau, J. Martínez, P. y Paret, D. (2009). Seguimiento del riesgo geológico y estudio de la peligrosidad de caída de rocas en el Cremallera de Núria. En proc. De: Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables, Barcelona, 2009.

UEE (Unión Española de Explosivos). (2004). Estudio de vibraciones. Túnel para tren cremallera Vall de Núria (Girona). Noviembre. 25 pp.

Wieczorek, G.F., Wilson, R.C., and Harp, E.L. (1985). Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County California: *U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations* Map I-1257-E, scale 1:62,500.

Wilson, R.C., and Keefer, D.K. (1983). Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 73, pp. 863-877.

8. AGRADECIMIENTOS

A Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, especialmente a David Paret y Josep Comellas, impulsores de primera línea de los trabajos sobre desprendimientos en el entorno del tren cremallera de la Vall de Núria durante el proyecto del túnel y ejecución de la obra. También al personal de GEOCAT Ivan García, Héctor Rodríguez y Elisabet Prat, que intervino en el trabajo de campo.